

文章编号 1004-924X(2008)07-1171-06

波前编码系统的新设计

雷广智^{1,2}, 张新¹, 张建萍^{1,2}, 杨皓明³, 何锋贇^{1,2}, 张欣^{1,2}

1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术中心, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;
3. 南开大学 现代光学研究所 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 利用传统光学系统评价指标斯特利尔比和能量集中度来表征波前编码系统的成像特征, 建立了系统“离焦不敏感性”的评价函数。采用所建立的评价函数设计了应用波前编码技术的三片式系统, 系统焦深比原系统扩展 $10\times$ 以上。结果表明: 新设计方法使得波前编码系统设计得以在流行的光学设计软件 CODE V、zemax 中实现, 并可以很方便地控制“离焦不敏感性”和“图像可恢复性”之间的平衡, 解决了目前波前编码系统设计时没有现成软件, 没有成熟方法的问题。

关键词: 焦深; 波前编码; 相位板; 优化设计

中图分类号: TH703; O439 **文献标识码:** A

Novel optimization method for wavefront coding system

LEI Guang-zhi^{1,2}, ZHANG Xin¹, ZHANG Jian-ping^{1,2},
YANG Hao-ming³, HE Feng-yun^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}

1. *Optical Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of the Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)*

Abstract: In order to bring forth a new method to design Wavefront Coding(WFC) system with commercial lens design software, a new merit function formed by the traditional imaging quality factor, Strehl Ratio(SR) and Encircled Energy(EE), was proposed to describe the “insensibility to defocus”. A triplet system using WFC technology was designed by the new merit function. The new system extends the depth of focus more 10 times than that of the original system. The results show that the WFC system designed by proposed optimal method can be achieved in design software CODE V and zemax and can come to a better trade-off between “insensibility to defocus” and “restorability”.

Key words: depth of focus; wavefront coding(WFC); phase mask; optimization design

收稿日期: 2007-10-09; 修订日期: 2007-12-28.

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(No. O69Y32J060)

1 引言

扩大光学系统的焦深、景深,一直是光学系统研究领域的焦点,60年代以来,科研人员先后提出过光学切趾法、环形光瞳法、Fresnel波带片法等多种方法来解决这一问题,这些方法的共同特点是纯粹从光学角度出发,通过在光学系统中采用非传统的光学元件来达到扩大焦深、景深的目的。

1995年,美国科罗拉多大学的 Dowski 等创新性地传统的扩大系统焦深的方法和数字图像处理技术相结合,提出了波前编码成像技术^[1]。波前编码技术的主体思想是:在光学系统中加入一个特殊形式的相位板,通过选择适当的相位板形式,使光学系统具有对系统离焦不敏感的特性,且系统光学传递函数(OTF)在全离焦范围内没有零点。因此,形成的中间像不会损失目标信息。然后,通过数字图像处理的方式解码,恢复出目标图像。

本文提出了一种优化设计波前编码成像系统的新方法。介绍了波前编码系统设计的相关研究背景和优化设计的原理及实现方法,给出了利用此思想的一些设计结果,最后对研究结果进行了总结和讨论。

2 研究背景

波前编码系统的设计思想不同于传统光学系统的设计思想,其关键之处在于系统的评价方式和设计方法,目前在这两方面尚没有形成成熟的理论和方法。

当前,波前编码系统的设计主要有结合模糊函数和稳相法的解析设计方法^[1-3]以及基于不同评价方式的优化设计方法^[4-6];对系统的评价主要有菲舍尔信息量^[1,5-6](Fisher Information, FI)、斯特利尔比^[7-8](Strehl Ratio, SR)和质量因子^[9](Quality Factor, QF)等评价方法。

采用解析方法只能求得编码的大体形式^[1,12],而不能精确求解其具体参数,因此必须用优化设计方法进行更细致的设计。目前的几种系

统评价方式在优化设计时各有优缺点,其共同的缺点是很难利用现有的光学设计软件直接进行优化设计,主要原因是难于表达、计算量大等。

3 优化设计原理

波前编码系统的评价要点是系统对离焦像差的“不敏感性”,本文采用调制传递函数(MTF)作为“不敏感性”的评价参量,系统的离焦“不敏感性”可以用 $\frac{\partial}{\partial \omega_{20}} H(u, \omega_{20})$ 来表示。理想的波前编码系统应满足 $\frac{\partial}{\partial \omega_{20}} H(u, \omega_{20}) = 0$,但采用这种计算方式判断时,需要考察不同空间频率和不同离焦位置,数据量过大,并不实用。因此,本文将每一条 MTF 曲线的一些特征参量提取出来,只要不同 MTF 曲线的这些特征参量相等或相差很小,便认为 MTF 离焦“不敏感性”好,这里选用 MTF 对空间频率的不同级次的积分作为特征参量。

实践证明,一般波前编码系统设计时只需取到二次积分即可,将 MTF 的一次积分和二次积分分别作为特征参量,其物理意义分别为系统的 SR 和能量集中度(Encircled Energy, EE),因此系统的“离焦不敏感性”可以用 $\frac{\partial}{\partial \omega_{20}} \int H(u, \omega_{20}) du$ 和 $\frac{\partial}{\partial \omega_{20}} \int |H(u, \omega_{20})|^2 du$ 来表示。具体设计时,可以选取不同的离焦位置,求得其 SR 和 EE,以它们的均方误差(MSE)作为评价函数。将不同的离焦位置记为 τ_i ,表征系统“不敏感性”的评价函数可以表示为:

$$\begin{cases} \text{SRMF} = \sum_i |\text{SR}(\tau_i) - \overline{\text{SR}}|^2 \\ \text{EEMF} = \sum_i |\text{EE}(\tau_i) - \overline{\text{EE}}|^2 \end{cases}, \quad (1)$$

波前编码系统设计时要注意的另外一个问题是系统的“可恢复性”。由于在解码恢复过程中系统会引入噪声增益,如果中间像的成像质量太差,噪声增益变得明显,解码恢复后得到的最终图像的成像质量也不好,因此在设计过程中要兼顾中间像的成像质量。这一点在一般的光学设计软件

中很容易实现^[13-14],只需加入适当的评价函数即可。

综合“不敏感性”和“可恢复性”,系统的评价函数可以定义为:

$$MF = W_i * (SRMF + EEMF) + W_r * DMF, \quad (2)$$

其中, W_i 和 W_r 分别是“不敏感性”和“可恢复性”的权重, DMF 是系统提供的默认评价函数,设计时可以灵活选用。

这样建立评价函数的好处是:可以很方便地在现有光学系统设计软件中实现设计,并且计算量不大,设计速度比较快。而且,可以很容易地控制“不敏感性”和“可恢复性”二者之间的平衡。

4 优化设计举例

在第三部分中提出的优化设计方法可以在 CODE V、zemax 等光学设计软件中实现,本文的设计都采用了 zemax 软件。

4.1 设计三片式物镜的波前编码系统

设计思路:首先设计 3 片物镜,然后在系统光瞳处加入编码元件,编码元件的形式为: $\theta(x, y) = \alpha(x^3 + y^3) + \beta(x^2y + xy^2)$ 采用这种光瞳形式的主要目的是对 Dowski 等最初提出的三次位相形式进行高阶修正,以取得更好的设计结果。利用上述优化设计方法对编码元件的参数 α 和 β 进行优化。所设计的系统结构如图 1 所示:

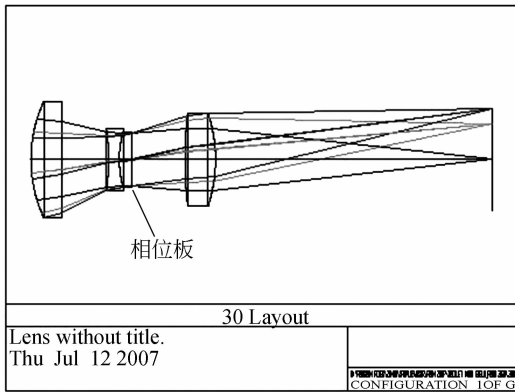


图 1 设计采用的系统结构

Fig. 1 Layout of designed system

系统采用可见光波段, $F \# / 4.5$, 因此焦深范围大约为 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。考察系统在 $10 \times$ 焦深范围内的成像效果,分别取离焦位置为 -0.2 、

-0.1 、 0 、 0.1 和 0.2 mm ,传统系统和波前编码系统的 MTF 曲线如图 2 所示,图中的 MTF 曲线取自视场中心,后面会对不同视场的情形再做讨论。可以看出:传统系统的成像质量随离焦变化明显,而波前编码系统则对离焦不敏感。

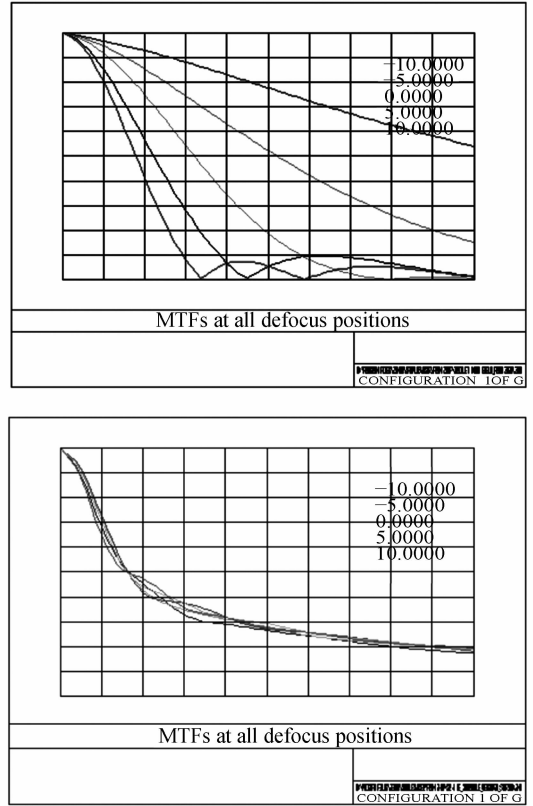


图 2 传统系统(上)和波前编码系统(下)不同离焦位置的 MTF 曲线

Fig. 2 MTFs of traditional(top) and WFC(bottom) systems at different defocus positions

波前编码系统的另一重要特征是成像质量随视场变化也不敏感,这样在解码恢复过程中对不同视场可以采用同一处理方式,即都用准焦的 PSF 或 MTF 来恢复。所设计系统不同视场的 MTF 曲线如图 3 所示,图中选取准焦位置考察不同视场的成像质量。可以看出,波前编码系统与传统系统相比,视场对成像质量的影响明显降低,不同视场具有相当的成像质量,因此在后面讨论系统离焦的讨论中只考察中心视场的情形。

两个系统的 PSF 如图 4 所示,在图 4 中也可以看到波前编码系统的点扩散函数基本不随系统离焦的变化而变化。

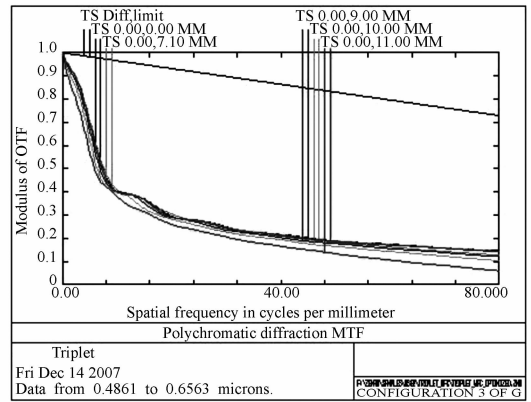
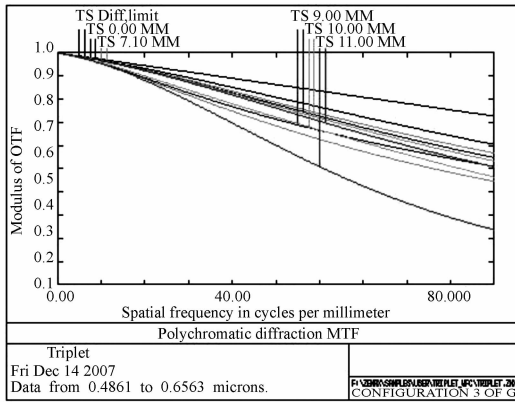


图 3 系统处于准焦位置时,传统系统(左)和波前编码系统(右)不同视场的 MTF 曲线
Fig. 3 MTFs of the traditional(left) and WFC(right) system, when system is in focus

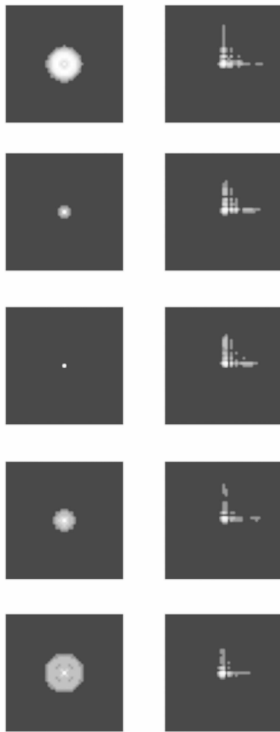


图 4 传统系统(左)和波前编码系统(右)在不同离焦位置的 PSF
离焦位置自上而下依次为: -0.2 、 -0.1 、 0 、 0.1 和 0.2 mm

Fig. 4 PSFs of traditional(left) and WFC(right) systems at different defocus positions
defocus position from top to bottom: -0.2 、 -0.1 、 0 、 0.1 and 0.2 mm

4.2 波前编码系统总体平衡

前面提到波前编码系统的设计过程中要进行

“不敏感性”和“可恢复性”之间的平衡:如果仅仅考虑系统的“不敏感性”,使得系统的 MTF 过低,中间像的图像质量太差,经过解码过程后系统的噪声增益显著,会影响最终的成像效果^[10-11];同样,如果为了提高“可恢复性”而使“不敏感性”太差的话,便会减小系统可清晰成像的离焦范围,使系统指标下降。图 5 为二者取不同权重时所设计系统的 MTF 曲线,设计过程中固定 $W_i = 1$, W_r 依次取不同权重,其优化设计的掩模板参数如表 1 所示:

表 1 设计的掩模板参数

Tab. 1 Phase mask parameters

W_r	α	β
0	0.143 42	$-0.005\ 665$
1	0.010 458	$-0.001\ 073$
10	0.008 222	$-0.000\ 043$

从图 5 中可以看出,随着 W_r 的增大,系统中、高频 MTF 都有显著的提升,但系统对离焦的“不敏感性”下降,在图 5 中表现为不同的 MTF 曲线吻合状况下降。图 6 为上述系统经解码恢复后系统整体的 PSF 状况。

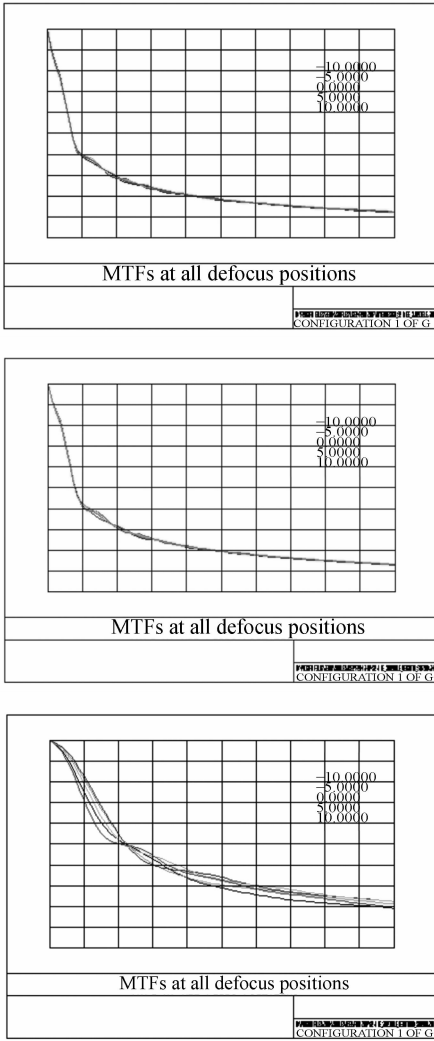


图 5 “离焦不敏感性”和“可恢复性”之间的平衡

W_r 自上而下依次为 0、1、10

Fig. 5 Trade-off between "the insensitivity to defocus" and "the restorability"

W_r from top to bottom: 0、1、10

可以看到,在 W_r 较小的时候,不同离焦位置的成像质量在同一水平上,随着 W_r 的增加,不同

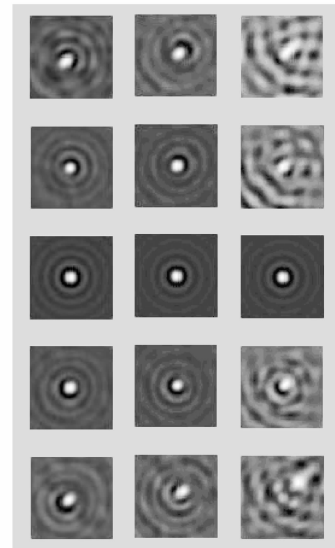


图 6 解码后系统的 PSF

W_r 自左而右依次为 0、1、10;离焦位置自上而下依次为: -0.2、-0.1、0、0.1 和 0.2 mm

Fig. 6 Restored PSFs

W_r from left to right: 0、1、10;defocus positions from top to bottom: -0.2、-0.1、0、0.1 and 0.2 mm

离焦位置成像质量的差别越来越大,因此可以根据不同的系统指标要求,选择适当的优化权重,其具体参数确定需要进一步的研究。

5 结 论

本文提出了波前编码成像系统的一种优化设计方法,其特点是融合了波前编码技术的核心思想,通过组合不同的传统设计参数来实现,也能直接利用现有光学设计软件来实现。应用此设计方法设计的 $F_\#/4.5, f' = 72$ mm 的三片式物镜的焦深比传统系统扩展了 $10\times$ 以上,并能方便地控制系统“不敏感性”和“可恢复性”之间的平衡。

参考文献:

[1] DOWSKI E R,CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*,1995,34 (11):1859-1866.

[2] BRENNER K H,LOHMANN A W,OJEDA-CASTANEDA J. The ambiguity function as a polar display of the OTF[J]. *Optics Communications*,1983,44(5):323-326.

[3] CASTRO A,OJEDA-CASTANEDA J. Increased depth of field with phase-only filters: ambiguity function[J]. *SPIE*,2005,5827:1-11.

- [4] BAGHERI S, SILVEIRA P, SILVEIRA E X, *et al.*. Design and optimization of the cubic-phase pupil for the extension of the depth of field of task-based imaging systems[J]. *SPIE*, 2006, 6311: 6311OR1-10.
- [5] 赵廷玉, 张文字, 叶子, 等. 应用费希尔信息量评价函数的波前编码系统设计[J]. 光学学报, 27(6): 1096-1101.
ZHAO T Y, ZHANG W Z, YE Z, *et al.*. Design of wavefront coding system based on evaluation function of fisher information[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 1096-1101. (in Chinese)
- [6] PRASAD S, PAUCA V P, PLEMMONS R J, *et al.*. Pupil-phase optimization for extended-focus, aberration corrected imaging systems[J]. *SPIE*, 2004, 5559: 335-345.
- [7] MEZOUARI S, HARVEY A. Phase pupil functions for reduction of defocus and spherical aberrations[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(10): 771-773.
- [8] MEZOUARI S, MUYO G, HARVEY A, *et al.*. Circular symmetric phase filters for control of primary third-order aberrations: coma and astigmatism[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, 23(5): 1058-1062.
- [9] MEZOUARI S, HARVEY A R. Wavefront coding for aberration compensation in thermal imaging systems[J]. *SPIE*, 2001, 4442: 34-42.
- [10] DOWSKI E R, KUBALA K S. Modeling of wavefront coded imaging systems[J]. *SPIE*, 2002, 4736: 116-126.
- [11] DOWSKI E, KUBALA K. Design and optimization of computational imaging systems[J]. *SPIE*, 2004, 5299: 155-162.
- [12] 杨皓明, 张新, 方志良, 等. 含三次位相元件照相物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1026-1031.
YANG H M, ZHANG X, FANG ZH L, *et al.*. Design of a photographic objective using cubic phase plate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1026-1031. (in Chinese)
- [13] 杨皓明, 王灵杰, 翁志成, 等. 大孔径大视场轻小型星敏感器光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 151-154.
YANG H M, WANG L J, WENG ZH CH, *et al.*. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 151-154. (in Chinese)
- [14] 杨皓明, 王灵杰, 冯秀恒. 一种新型复合摄像物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 486-491.
YANG H M, WANG L J, FENG X H. Design of a new complex imaging object lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 486-491. (in Chinese)

作者简介: 雷广智(1982—), 男, 陕西大荔人, 研究实习员, 主要研究方向为特殊光学系统设计。E-mail: gzlei@ustc.edu

● 下期预告

直角坐标激光直写的动态曝光模型

张 山, 谭久彬, 王 雷, 金占雷

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

在兼顾胶层的光吸收特性、直写光束的高斯分布特征以及直写光束与胶层相对运动的情况下, 建立了直角坐标激光直写的动态曝光模型, 据此有效预测线条的线宽和侧壁角。仿真实验表明: 以恒值高斯光强曝光时, 该模型与等效仿真条件下的 Dill 曝光模型仿真结果完全一致, 进一步证明了该模型的有效性和正确性, 从而解决了目前在激光直写中存在的只能预测线宽或在忽略光刻胶吸收作用的情况下粗略估计直写线条轮廓的问题。同时, 基于该模型分别分析了直写光功率和直写速度对线条轮廓的影响机理, 为优化激光直写工艺的加工参量提供了一种有效的分析途径。